

文章编号: 1006-6616 (2013) 04-0423-08

强降雨作用下边(滑)坡稳定性 分析及预警技术研究

朱志铭, 周凯睿, 谭春洪, 边菁生, 魏源, 邹祖银
(四川农业大学城乡建设学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 以四川汉源二蛮山滑坡为例, 根据现场滑坡情况勘查及室内试验确定土体参数; 选择内置 VBA 为开发工具, 开发基于 ArcGIS 的边(滑)坡稳定性分析插件, 并据此得出研究区域危险区划评价图。研究表明, 特殊地形条件、震后地质构造、连续强降雨以及坡体非饱和渗流等, 使孔隙水压力增加和土基质吸力迅速减少, 导致坡体滑移面处土的抗剪强度降低而发生滑坡; 基于 ArcGIS 软件得出研究区域危险区划评价图, 与滑坡的实际情况具有较高吻合度。研究成果为深入分析强降雨对边(滑)坡影响及边(滑)坡预警提供了新的途径。

关键词: 震后边坡; 强降雨; 滑坡; 稳定性评价; 滑坡预警

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

强降雨是导致边(滑)坡失稳的常见因素^[1-2]。全国 290 个县市地质灾害调查结果显示, 暴雨诱发的滑坡占滑坡总数的 90%^[3]。特别是在“5.12”汶川震后灾区, 因地震引发崩塌、滑坡而产生的大量松散固体物质仍残留于山体上, 在强降雨条件下极易诱发次生地质灾害。本文以四川汉源二蛮山滑坡为例, 利用实验室三轴试验仪等仪器得出滑坡土体的相关参数^[4]并结合 ArcGIS 开发“降雨-滑坡”新控件, 输入相关属性数据进行分析处理, 得出直观的灾害预测图。研究成果可为震后连续降雨工况下边坡安全性评价与边(滑)坡预警技术的发展与工程运用提供可靠新依据。

1 二蛮山地质概况及力学参数实验

1.1 地质概况

二蛮山为一单斜山体, 西南侧槽状沟谷呈“V”型展开。山体主要由二叠系峨眉山玄武岩 (Pe) 和二叠系梁山组一阳新组 (Pl+y) 灰岩构成。该区地震基本烈度Ⅶ度 (0.15g)。

1.2 水文条件

沟谷宽约 700 m, 从源头至沟口堆积扇顶部长约 1476 m, 汇水面积约 1.3 km²。该区以

收稿日期: 2013-06-02

基金项目: 四川农业大学“大学生创新性实验计划”项目 (121062672)

作者简介: 朱志铭 (1988-), 男, 四川农业大学城乡建设学院土木工程专业本科生。E-mail: 1960415816@qq.com

通讯作者: 邹祖银 (1974-), 男, 副教授, 在读博士, 主要从事道路与铁道工程的科研和教学工作。E-mail: zouzyin@gmail.com

夜间阵雨和暴雨为主，孔隙潜水赋存于堆积层 (Q_4^{sef}) 和崩坡积层 (Q_4^{c+dl}) 土壤，碎石土土层，地下水位受季节影响大，保水性较差，水量大。

1.3 力学参数实验

本次研究采集了二蛮山滑坡土样 (含黏土碎石等)，最大粒径 5 mm，并研究了 2 d 累积降雨情况下不同含水率滑带土的强度参数，岩层物理力学参数见表 1。含水率 W 与土体的 $\tau_f - \sigma$ 、粘聚力 c 、摩擦角 φ 的关系分别见图 1—图 3。

表 1 岩层物理力学参数

Table1 Physical and mechanical parameters of rocks

分组	名称	E/GPa	ν	G/GPa	K/GPa	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	σ_1/MPa	$D/(N \cdot m^{-3})$
1	土层	0.7	0.26	0.33	1.07	17.0	38	0.15	19600
2	灰岩	30.1	0.27	11.90	21.80	67.2	42	1.58	26900
3	玄武岩	68.8	0.30	26.50	57.30	662.0	31	13.10	30000

E —弹性模量； ν —泊松比； G —剪切模量； K —体积模量； c —粘聚力； φ —内摩擦角； σ_1 —抗拉强度； D —容重

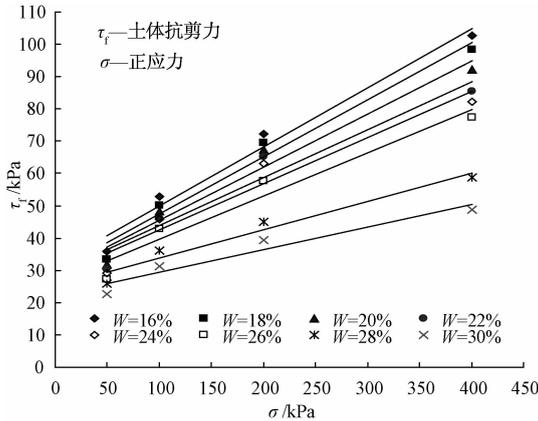


图 1 不同含水率条件下 $\tau_f - \sigma$ 关系

Fig. 1 Relationship between τ_f and σ different moisture content test

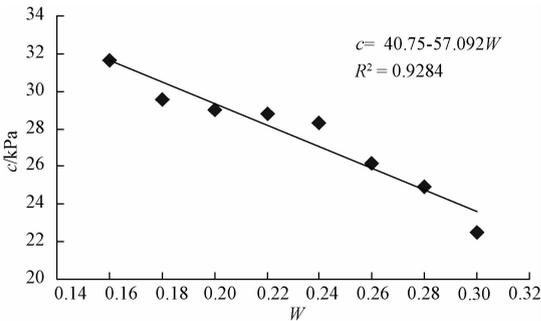


图 2 含水率 W 对粘聚力 c 的影响
Fig. 2 Moisture content on the influence of the friction Angle

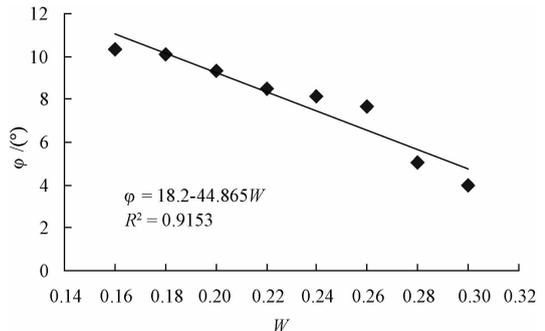


图 3 含水率 W 对摩擦角 φ 的影响
Fig. 3 Effects of moisture content of cohesive force

图 1—图 3 表明：土的粘聚力 (c) 和摩擦角 (φ) 随含水率的增加而迅速减小，从而降低了土的抗剪强度。

2 强度折减法计算结果分析

2.1 安全系数计算

本文根据研究区不同岩土层情况将滑坡坡体划分为2个结构面(见图4),分别为Pl+y/Pe 305°∠40°(图4中紫色部分)和Pe/上覆土 150°∠80°(图4中红色部分),同时考虑 φ 和 c 双折减(配套折减)系数^[5],即:

$$\tan\varphi_1 = \tan\varphi/A_1 \quad (1)$$

$$c_1 = c/R_1 \quad (2)$$

其中: A_1 ——内摩擦角 φ 的折减系数; R_1 ——粘聚力 c 的折减系数。

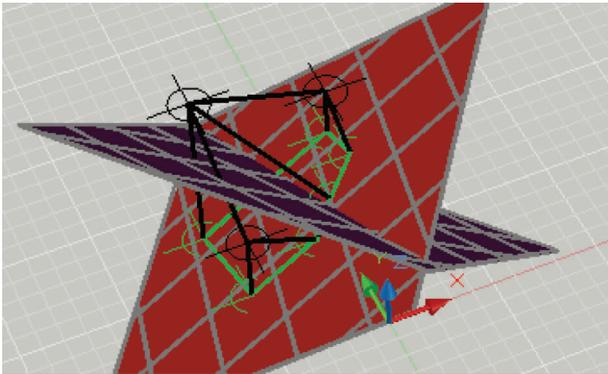


图4 结构面

Fig. 4 Structural plane

将折减后的 c_1 和 φ_1 代入如下的安全系数计算公式^[6]即得安全系数。

$$F = \frac{\sum \{ [c_1 l_i - p_i l_i \tan\varphi_{1i}] \cos\alpha_i + (V_i + \Delta H_i) \tan\varphi_{1i} \}}{\sum (V_i + \Delta H_i) \tan\alpha_i} \frac{\sec 2\varphi_{1i}}{1 + \tan\varphi_{1i} \tan\alpha_i / F} \quad (3)$$

其中: p_i ——第 i 条土孔隙水压力, kPa; c_1 ——折减粘聚力, kPa; α_i ——第 i 条土计算倾角, (°); ΔH_i ——第 i 条土水平推力, kPa; V_i ——第 i 条土铅直力, kPa; φ_{1i} ——第 i 条土折减摩擦角, (°); l_i ——第 i 条土厚度, m。

2.2 计算结果及安全性评价

本文以50 mm/d雨强为标准,同时考虑剪切模量、体积模量等参数的软化和入渗饱水加载作用^[7],对 φ 和 c 分别进行0.44、0.58、0.76倍折减,并计算安全系数。

当0折减时,安全系数约为1.78,即 $F_0 > 1$,坡体稳定;0.44倍折减时,安全系数 F_1 为1.19,仍然大于1,但已较折减前降低了36.05%;0.58倍折减时,安全系数 F_2 为1.02,亦即约等于1,较折减前降低了46.53%,降雨量稍增立即引发滑坡;当对 φ 和 c 进行0.76倍折减时,安全系数 F_3 为0.84,较折减前降低了51.26%,安全系数小于1,安全储备为0,边坡失稳滑坡。由此可知,随着降雨量的增加,岩土强度参数 c 、 φ 快速衰减,安全系数也随之递减,边坡渐趋失稳。

3 基于 ArcGIS 的边（滑）坡稳定性分析控件

本文根据边（滑）坡地质灾害以及 GIS 软件的特点，选择内置的 VBA（Visual Basic for Application）为开发工具，开发了基于 ArcGIS 的边（滑）坡稳定性分析插件。该插件本质上可以看成是边（滑）坡稳定分析模型与 GIS 集成进行边坡安全系数计算的扩展模块。图 5 为 Visual Basic 开发界面。



图 5 VB 开发界面
Fig. 5 The development of interface

3.1 系统界面设计

系统主界面如图 6 所示，各模块数据库连接端口说明见表 1。在 ArcGIS 软件工具栏上增加了一个“☺”模块（稳定性分析插件），输入、输出界面符合日常使用习惯，可操作性强。

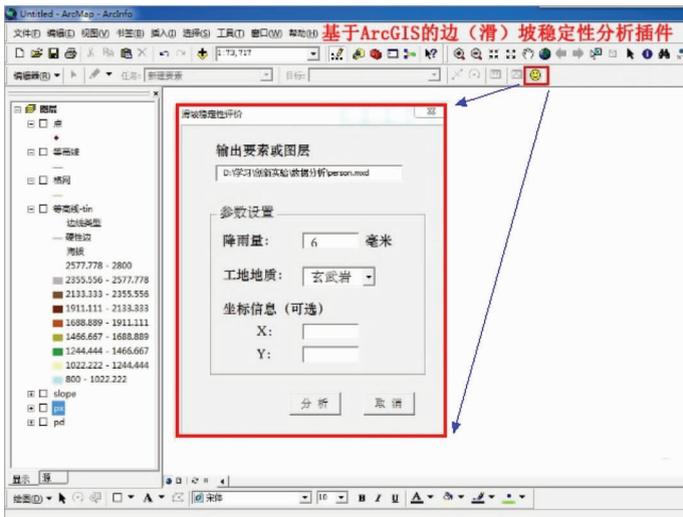


图 6 操作主界面
Fig. 6 Main Operating interface

表1 模块数据库连接端口说明

Table 1 Module database

功能	类库	接口	方法
坡度	GeoAnalyst Library	ISurfaceOP	Slope
坡向	GeoAnalyst Library	ISurfaceOP	Aspect
输出	GeoAnalyst Library	IrasterExportOp	ExportToShp
输入	GeoAnalyst Library	IrasterImportOp	AddRasterData
高程	GeoAnalyst Library	ISurfaceOp Interface	Coutour
重分类	GeoAnalyst Library	IRclassOp	Reclass

与图6“☀️”模块部分对应的核心代码如下:

```
Private Function EditFeature ( pFeatureClass
As IFeatureClass) As Boolean
    Dim pFeature As IFeature
    Dim pFeatureCursor As IFeatureCursor
On Error GoTo ErrorHandler:
    Dim rain As String
    Dim geology As String
    Dim geo As Double
    rain = Text2. Text
    geology = Combo1. Text
If (rain Is nothing) Then
    MsgBox (“请填入雨量数据”)
If (geology = “玄武岩”)
.....
    pFeature. Value (12) = R * (pFeature. Value (7) + pFeature. Value (8)
+ pFeature. Value (9) + geo + rain)
.....
End Function
Private Sub UIButtonControl1_ Click ()
.....
```

稳定性分析插件核心操作步骤: ①数据输入(汉源县连续2天降雨, 累计降雨量达163 mm^[8-9]); ②参数设置(调整坡度、坡向); ③数据分析, 主要有单因子分析(见图7)和多因子耦合分析(见图8); ④数据输出, 得出灾害区划图。

3.2 稳定性分析

本文主要对诱发滑坡的降雨量进行单因子分析, 然后耦合其他次要因子(坡度、坡向等, 假设为定值), 最终分析得到安全系数曲线(见图9)。

3.3 分析结果与滑坡实际情况对比

基于“模糊集合论”理论, 将诱发滑坡的因子抽象成数学模型并量化, 即可用函数定量计算^[10], 将模型与GIS相结合, 建立基础属性数据库, 设置滑坡的预测参数, 计算出潜在危险系数, 再利用ArcGIS的重分类功能得出研究区域危险区划评价图(见图10)。



图7 坡度单因子分析结果
Fig. 7 Single factor analysis

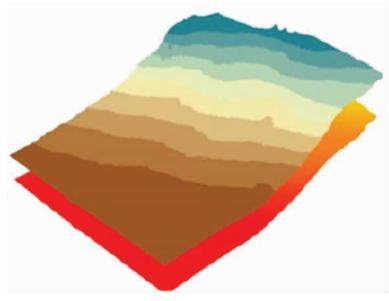


图8 简单2因子(坡度+降雨量)耦合分析结果
Fig. 8 Coupled superposition analysis

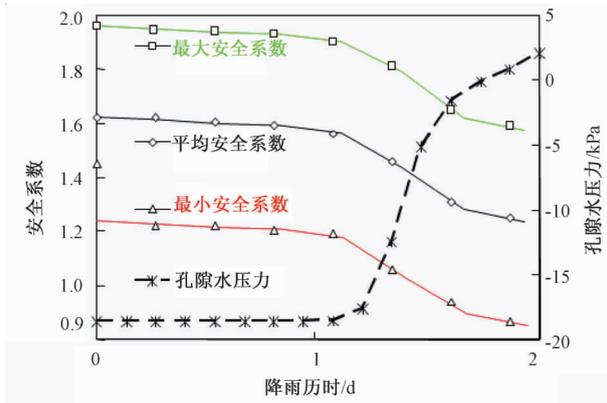


图9 安全系数随时间变化曲线
Fig. 9 Safety coefficient changing with time curve

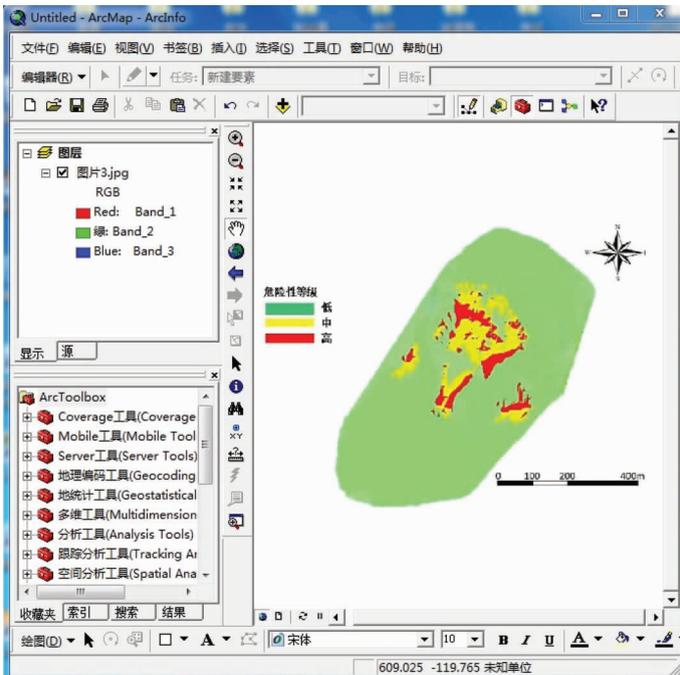


图10 危险性评价图
Fig. 10 Picture of risk assessment

由以上分析可知,随着坡体含水量的增加,坡体孔隙水压力也增加,土基质吸力迅速减小,土体抗剪能力衰减加快,原来的稳定区(现场滑坡滑动前的滑坡体,见图11)很快转化为高危滑坡区(现场滑坡的滑坡体启动区,见图12),安全系数迅速递减(由 $F_0 = 1.78$ 减小至 $F_3 = 0.84$),最终失稳滑坡。



图11 实际滑坡前的滑坡体

Fig. 11 Before the actual landslide



图12 实际滑坡过程图

Fig. 12 Actual landslide process diagram

4 结论与建议

通过 ArcGIS 开发新控件,分析处理得出的安全系数曲线图与实际几何计算得出的滑坡安全系数分析结果进行对比,灾害区域滑坡概率吻合度较高,这为量化研究降雨滑坡机理分析提供了基础。

GIS 软件具有强大的空间数据处理和管理能力,能实现边坡数据存储与管理,边坡的三维建模与可视化,但缺乏有力的数值分析与计算能力,不具有其他专业软件(如 ANSYS、FLAC 等)进行边坡稳定评估的功能,系统集成为解决 GIS 分析功能不足提供了较好方案。GIS 与 ANSYS、FLAC 等软件如何实现数据共享也是一个有重要意义的研究内容。

参 考 文 献

- [1] 陶骞,刘超,朱志铭,等. 多工况下汉源二蛮山滑坡机理数值模拟[J]. 地质力学学报, 2012, 18(4): 440~450.
TAO Qian, LIU Chao, ZHU Zhi-ming, et al. Numerical simulation of landslide mechanism at Ermanshan in Hanyuan under different conditions [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18(4): 440~450.
- [2] 王磊,张春山,杨为民,等. 基于 GIS 的甘肃省甘谷县地质灾害危险性评价[J]. 地质力学学报, 2011, 17(4): 388~401.
WANG Lei, ZHANG Chun-shan, YANG Wei-min, et al. Risk assessment of geo-hazards by using GIS in Gangu County, Gansu Province [J]. Journal of Geomechanics, 2011, 17(4): 388~401.
- [3] 魏丽,单九生,章毅之,等. 暴雨型滑坡灾害形成机理及预测方法研究思路[J]. 江西气象科技, 2005, 28(3): 17~22.
WEI Li, SHAN Jiu-sheng, ZHANG Yi-zhi, et al. The formative mechanism and the research idea of prediction method about coast disaster of rainstorm model [J]. Jiangxi Meteorological Science and Technology, 2005, 28(3): 17~22.
- [4] 黄润秋,邓荣贵,张卓元. 高边坡物质运动全过程模拟[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993: 87~121.

HUANG Run-qiu, DENG Rong-gui, ZHANG Zhuo-yuan. Full course numerical simulation of high slope material movement [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1993: 87 ~ 121.

- [5] 唐芬, 郑颖人. 基于双安全系数的边坡稳定性分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (11): 39 ~ 44.
TANG Fen, ZHENG Ying-ren. Slope stability analysis based on two safety factors [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (11): 39 ~ 44.
- [6] 李兆平, 张弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究 [J]. 土木工程学报, 2001, 34 (5): 57 ~ 61.
LI Zhao-ping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34 (5): 57 ~ 61.
- [7] 谭春洪, 朱志铭, 周凯睿, 等. GIS在滑坡稳定性评价中的应用研究——以汉源县二蛮山为例 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (3): 295 ~ 303.
TAN Chun-hong, ZHU Zhi-ming, ZHOU Kai-rui, et al. Application of GIS in landslide stability evaluation: A case study for Ermanshan landslide [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19 (3): 295 ~ 303.
- [8] 陈丽霞, 殷坤龙, 刘长春. 降雨重现期及其用于滑坡概率分析的探讨 [J]. 工程地质学报, 2012, 20 (5): 745 ~ 750.
CHEN Li-xia, YAN Kun-Long, LIU Chang-chun. Return period statistics of extreme rainfall and application to landslide probability analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20 (5): 745 ~ 750.
- [9] 何专, 姚令侃. 地震和暴雨工况下边(滑)坡稳定性分析方法评价 [J]. 水土保持通报, 2009, 29 (3): 178 ~ 182.
HE Zhuan, YAO Ling-kan. Assessment on the methods of analyzing slope (landslide) stability under earthquake and rainstorm conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29 (3): 178 ~ 182.
- [10] 杜继稳. 降雨型地质灾害预报预警——以黄土高原和秦巴山区为例 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
DU Ji-wen. Forecasting and early warning for the geo-hazards caused by rainfall: Taking the geo-hazards in loess plateau and Qinling-Dabashan region as examples [M]. Beijing: Science Press, 2010.

STUDY ON TECHNOLOGY OF SLOPE/LANDSLIDE STABILITY ANALYSIS AND EARLY WARNING UNDER HEAVY RAINFALL

ZHU Zhi-ming, ZHOU Kai-rui, TAN Chun-hong, BIAN Jing-sheng, WEI Yuan, ZOU Zu-yin
(Urban and Rural Construction College, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, Sichuan, China)

Abstract: Erman mountain landslide of Han Yuan County as the example, according to the exploration of landslide site conditions and indoor test of soil parameters; Choosing a built-in VBA for development tool to develop the side (slip) slope stability analysis plug-in based on ArcGIS, which makes the study regional risk zoning assessment diagram. Results show that the special topographical condition, geological structure after the earthquake, continuous heavy rains filled water load, slope unsaturated seepage flow, increasing the pore water pressure and rapidly reducing the soil matrix suction, leads to the shear strength decreased of the slope slip plane in the soil and finally landslides. Risk zoning evaluation chart of research area based on ArcGIS and the actual situation of slide have goodness of fit. Research result provides a new way for further analyzing the effect on side slope (slip) and warning under heavy rainfall condition.

Key words: earthquake slope; rainfall; landslide; stability assessment; intuitive forecasting